monographie sectorielle

L'industrie du polysilicium

Québec

87-01621/

MONOGRAPHIE SECTORIELLE

L'INDUSTRIE DU POLYSILICIUM

Québec

Gouvernement du Québec
Ministère de l'Industrie
et du Commerce

Préparé par Albert Bouchard
Direction de la chimie
et de la métallurgie

Publié par la Direction des communications

Dépôt légal, 3e trimestre 1986
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN 2-550-16365-6
© Gouvernement du Québec, 1986

Sommaire

L'utilisation du polysilicium, ou silicium polycristallin, par l'industrie de l'électronique a connu une croissance très rapide au cours des 25 dernières années. Les taux de croissance prévus pour la période se terminant en 1990, soit de 15% à 30% par an, montrent bien que la situation passée se poursuivra dans l'avenir. L'intérêt majeur de l'industrie du polysilicium réside dans l'importante valeur ajoutée du produit et dans le haut degré de sophistication des technologies de production utilisées.

Le processus de transformation qui mène du silicium métallurgique aux composantes électroniques comprend six étapes majeures, soit le silicium métallurgique, le trichlorosilane, le polysilicium, sur lequel porte la présente monographie, le monosilicium, les gaufrettes de silicium et les composantes électroniques. Ces six étapes ne sont cependant pas indépendantes les unes des autres. En effet, le trichlorosilane et le polysilicium sont toujours associés ainsi que le monosilicium et les gaufrettes de silicium. De plus, on observe un certain nombre d'entreprises où plusieurs étapes sont intégrées les unes aux autres.

Une revue des producteurs actuels de polysilicium ainsi que des projets en marche ou à l'étude permettent de constater à quel point ce secteur industriel est dynamique. En effet, de 2 400 tonnes* qu'elle était en 1982, la capacité de production mondiale atteignait plus de 8 000 tonnes en 1985 et atteindra environ 17 000 tonnes en 1990. Si on ajoute à cela les projets à l'étude mais non encore confirmés, la capacité de production mondiale de polysilicium pourrait atteindre les 26 000 tonnes en 1990.

* Il s'agit ici, comme ailleurs dans le document, de tonnes métriques, soit 1 000 kilos ou 2 204,6 livres.

Par l'analyse des projets actuellement planifiés ou à l'étude, on constate que le choix de l'endroit où ils seront réalisés dépend, dans une large mesure, du prix et de la disponibilité de l'énergie électrique. En effet, à elle seule, la production de polysilicium nécessite environ 160 kWh/kg. Si on ajoute à ces kWh ceux qu'exige la fabrication des divers intrants nécessaires à la production du polysilicium, on obtient une consommation totale d'électricité pouvant varier entre 225 et 400 kWh/kg selon le degré d'avancement technologique des procédés utilisés.

Le Québec possède actuellement plusieurs des éléments qu'il faut pour réaliser les six étapes majeures du processus de transformation qui mène du silicium métallurgique aux composantes électroniques. En effet, on y produit déjà du silicium métallurgique et des gaz industriels, et on dispose de toute l'énergie électrique nécessaire à la production du polysilicium. De plus, le Québec a directement accès à un certain nombre d'entreprises situées sur son territoire, en Ontario et sur la côte Est des Etats-Unis qui sont dans le domaine de la fabrication de composantes électroniques.

Table des Matières

Page

Sommaire III

Table des matières V

Liste des figures IX

Introduction..... 1

1- L'industrie du polysilicium 3

2- Processus de transformation du silicium destiné à l'électronique..... 7

2.1 Silicium métallurgique 7

2.2 Trichlorosilane 7

2.3 Polysilicium 11

2.4 Monosilicium 13

2.5 Gaufrettes de silicium 17

2.6 Composantes électroniques 17

Page

3- Production de polysilicium 19

3.1 Etats-Unis 19

3.1.1 Hemlock Semiconductor 19

3.1.2 General Electric 20

3.1.3 Monsanto Electronic Materials Company .. 20

3.1.4 Motorola 21

3.1.5 Texas Instruments 21

3.1.6 Union Carbide 21

3.1.7 Wacker Siltronic Corporation 22

3.1.8 Ethyl Corporation 22

3.1.9 J.C. Schumacher 23

3.1.10 Great Lakes Chemical 23

3.1.11 Nippon Kokan K.K. 23

3.2 Europe 24

3.2.1 Dynamit Nobel Silicon 24

3.2.2 Phoenix Materials Company 24

Page

3.2.3 Wacker-Chemie GmbH 25

3.2.4 Rhône Poulenc et Siltec 25

3.3 Japon 25

3.3.1 Tokuyama Soda 25

3.3.2 Komatsu Electronic Metals 26

3.3.3 Hi-Silicon Co. Ltd. 26

3.3.4 Shin Etsu Handotai 27

3.4 Ailleurs dans le monde 27

3.4.1 Indes 27

3.4.2 République populaire de Chine 27

4- Transformation, au Québec, du silicium destiné à l'électronique 31

4.1 Silicium métallurgique 31

4.2 Trichlorosilane 32

Page

4.3 Polysilicium 32

4.4 Monosilicium 33

4.5 Gaufrettes de silicium 34

4.6 Composantes électroniques 34

5- Conclusion 35

Tableau 1 Producteurs mondiaux de polysilicium en 1985, projets planifiés et projets à l'étude pour 1990, en tonnes. 28

Liste des figures

Page

1- Evolution de la capacité de production et de la demande mondiale de polysilicium entre 1985 et 1990, en tonnes 6

2- Processus de transformation du silicium destiné à l'électronique 8

3- Répartition de la consommation du silicium métallurgique, aux Etats-Unis..... 9

4- Fabrication de trichlorosilane à partir de silicium métallurgique et d'acide chlorhydrique anhydre dans un réacteur à lit fluidisé 10

5- Fabrication de polysilicium par la réduction du trichlorosilane à l'aide d'hydrogène dans un four électrique (Procédé Siemens)..... 12

6- Fabrication de monosilicium par étirage de cristaux (Procédé Czochralski)..... 14

7- Fabrication de monosilicium par la fusion de zone (FZ) 16

Introduction

C'est dans le cadre de l'inventaire des industries grandes consommatrices d'électricité dressé par la Direction de la chimie et de la métallurgie du MIC que l'on a été amené à s'intéresser à l'industrie du polysilicium. En effet, une première analyse a permis d'établir que le prix et la disponibilité de l'énergie électrique étaient des facteurs d'implantation déterminants pour cette industrie.

Une série d'investigations a donc été entreprise et a conduit à la présente étude. On retrouvera donc dans ce document, qui se veut une monographie sectorielle, un certain nombre d'informations concernant:

- l'état général de cette industrie;
- les technologies employées;
- les producteurs actuels et potentiels ainsi que leurs projets;
- la présence du Québec dans cette industrie.

Le but du présent document est de brosser un tableau rapide de la situation de ce secteur industriel de façon à pouvoir renseigner adéquatement les différents intervenants actuels et potentiels.

1- L'industrie du polysilicium

C'est au cours de la Deuxième Guerre mondiale qu'on a commencé à produire du polysilicium pour l'industrie de l'électronique. La première entreprise à s'engager dans cette production a été E.I. Du Pont de Nemours & Company Inc. des Etats-Unis. Mais à la fin de la guerre, l'industrie a cessé ses activités et n'a reparu qu'en 1953 lorsque Bell Laboratories a demandé à Dupont de reprendre ses opérations, ce qui a donné, pour cette année-là, une production de 450 kg. Depuis ce temps, de nombreuses autres entreprises sont venues se joindre à Du Pont et la quantité ainsi que la qualité du polysilicium produit n'ont cessé de croître.

De 450 kg qu'elle était en 1953, la capacité de production mondiale de polysilicium est passée successivement à 100 tonnes en 1962, à 2 400 tonnes en 1982 et à 8 000 tonnes en 1985 et, avec les projets en cours, atteindra 17 000 tonnes en 1990.

Au cours des années, la croissance de la demande de polysilicium a été très inégale. De fait, on a connu des taux de croissance annuels aussi bas que 3% et aussi élevés que 60%. Une telle situation a provoqué aussi bien des périodes de surcapacité que des périodes où l'on n'arrivait pas à répondre à la demande. C'est pourquoi il est très difficile d'établir des prévisions pour les années à venir. Il y a en plus, à l'heure actuelle, l'utilisation du polysilicium pour le captage de l'énergie solaire qui est encore peu développée mais qui pourrait connaître des taux de croissance très élevés mais encore tout à fait imprévisibles. Compte tenu de cette situation, des taux de croissance annuels de la demande variant entre 15% et 30%, selon les experts consultés, et même au-delà dans certains cas sont avancés pour

les prochaines années. La figure 1 montre la relation entre différents taux de croissance de la demande et la capacité de production présentement prévue pour 1990. On est à même de constater que l'incertitude des années à venir risque de provoquer des situations assez semblables à celles connues dans le passé, soit des périodes de surcapacité alternant avec des périodes de souscapacité.

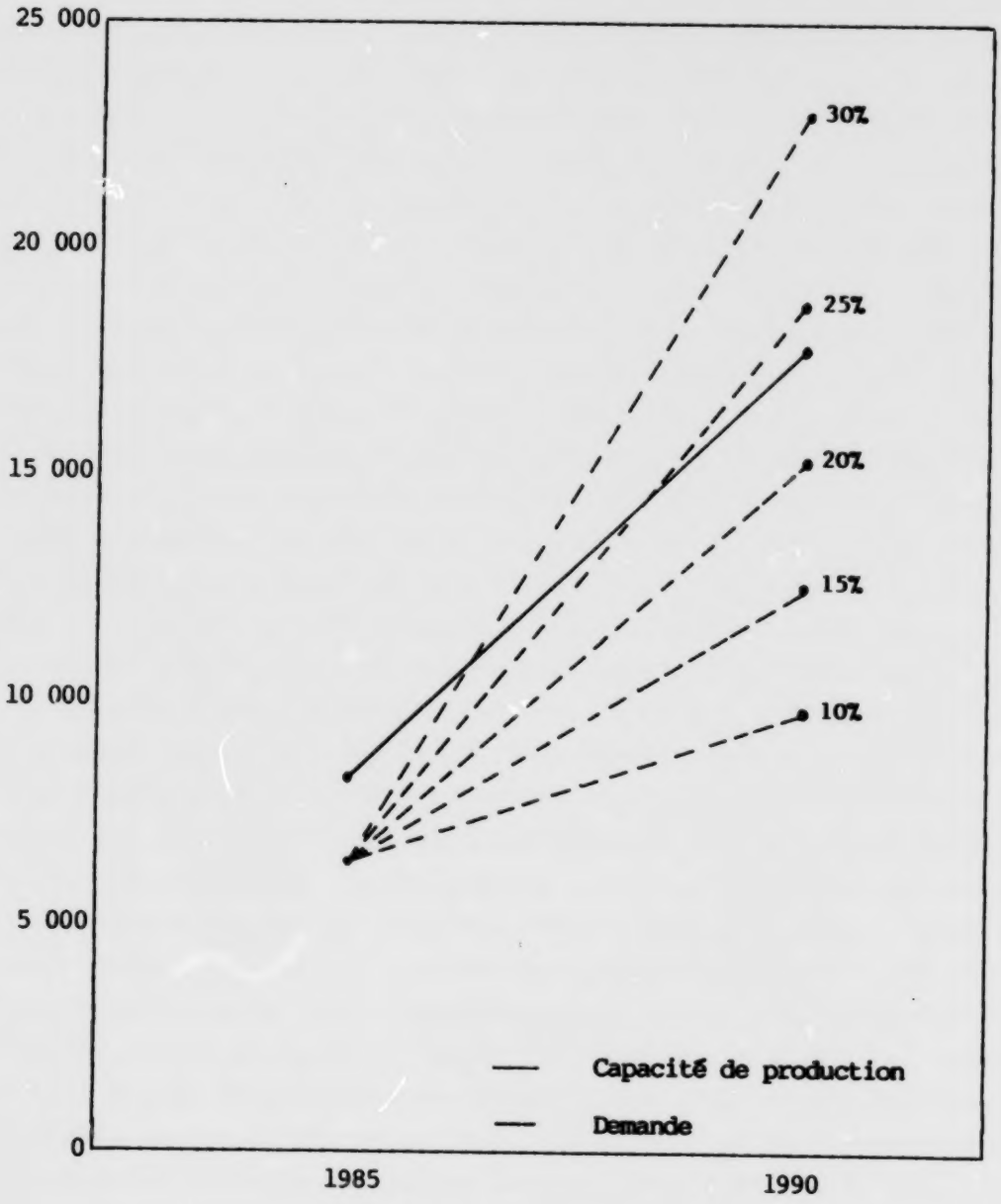
Si on se réfère à la capacité de production mondiale actuelle et à venir de polysilicium, on remarque que le tonnage que cela représente est relativement faible par rapport à d'autres produits plus traditionnels. Il ne faut cependant pas mesurer l'importance de cette industrie à l'aide de cette seule variable. En effet, la fabrication du polysilicium consiste à transformer un produit, le silicium métallurgique, ayant une valeur de l'ordre de 1,75 $/kg en un produit ultra-pur d'une valeur variant entre 100,00 $/kg et 125,00 $/kg. C'est donc par la valeur ajoutée que cette industrie prend toute son importance. Afin d'illustrer ce fait, comparons les ventes annuelles d'une usine de polysilicium d'une capacité de 1 000 t/an, ce qui semble être le standard à l'heure actuelle, avec celle de la nouvelle aluminerie de Bécancour dont la capacité est de 230 000 t/an. Les ventes de polysilicium varieraient entre 100 M$ * et 125 M$ alors que celles d'aluminium se situeraient entre 350 M$ et 375 M$. On constate donc que malgré sa petite taille en termes de tonnage, une usine de polysilicium est de grande taille en termes de ventes annuelles. Un autre point d'intérêt que présente cette industrie, bien qu'elle puisse être considérée comme une industrie primaire, est le haut degré de sophistication des technologies employées. En effet, la qualité, et surtout la grande pureté, exigées par les utilisateurs de polysilicium font que les producteurs ont dû mettre au point des procédés très sophistiqués pour répondre à ces besoins.

* M$: million de dollars

A l'heure actuelle, trois pays se partagent la majeure partie de la capacité de production mondiale de polysilicium. Il s'agit des Etats-Unis (41%), de l'Allemagne de l'Ouest (27%) et du Japon (27%). La valeur ajoutée du polysilicium rend le marché de ce produit international en ce sens que l'emplacement des nouvelles installations dépend beaucoup plus de la proximité des matières premières, telles que l'électricité et les gaz industriels, que de celle des utilisateurs.

Une brève analyse de la demande mondiale confirme ce fait puisqu'elle montre que, bien que les grandes régions productrices de polysilicium soient aussi celles qui consomment le plus de semiconducteurs, l'écart entre leur production et leur consommation est important. En termes de valeur, les grands consommateurs de semiconducteurs sont les Etats-Unis (61%), le Japon (29%) et l'Europe (8%). Il faut cependant faire une distinction entre la valeur et le volume des semiconducteurs consommés. En effet, bien que le Japon soit loin derrière les Etats-Unis en termes de valeur, il est cependant très près en termes de volume. Ce phénomène s'explique par le fait que l'industrie américaine est plutôt orientée vers les productions à faible volume et haute valeur ajoutée alors que le Japon se concentre sur les productions de masse à plus faible valeur ajoutée.

Figure 1 Evolution de la capacité de production et de la demande mondiale de polysilicium entre 1985 et 1990, en tonnes.



2- Processus de transformation du silicium destiné à l'électronique

La présente section décrit chacune des six étapes de ce processus qui mène du silicium métallurgique aux composantes électroniques (Figure 2).

2.1- Silicium métallurgique

Le silicium métallurgique (Si) est produit à partir de silice (SiO_2) et de carbone (C) dans un four électrique à arc submergé. Le produit obtenu a une teneur en silicium d'environ 98,5%. La production de silicium métallurgique nécessite une quantité importante d'électricité, soit environ 13,5 kWh/kg. Une nouvelle usine de silicium métallurgique d'une capacité de 25,000 t/an nécessite des investissements de plus de 100 M$. A l'heure actuelle, de 3% à 4% de la production mondiale de silicium métallurgique est destinée à la fabrication de semiconducteurs (Figure 3).

2.2- Trichlorosilane

Le trichlorosilane ($SiHCl_3$) se situe entre le silicium métallurgique et le polysilicium. Ce produit est obtenu en faisant réagir du silicium métallurgique et de l'acide chlorhydrique anhydre (HCl gazeux) dans un réacteur à lit fluidisé (Figure 4).

La grande majorité des producteurs de trichlorosilane sont aussi des producteurs de polysilicium. La capacité de production d'une usine de trichlorosilane se situe entre 4 000 et 18 000 tonnes par an et implique des investissements de l'ordre de 1 200 $ par tonne de capacité. La production d'un kilo de trichlorosilane nécessite environ 1,2 kg de silicium métallurgique et 3,2 kWh d'énergie électrique.

Figure 2 Processus de transformation du silicium destiné à l'électronique

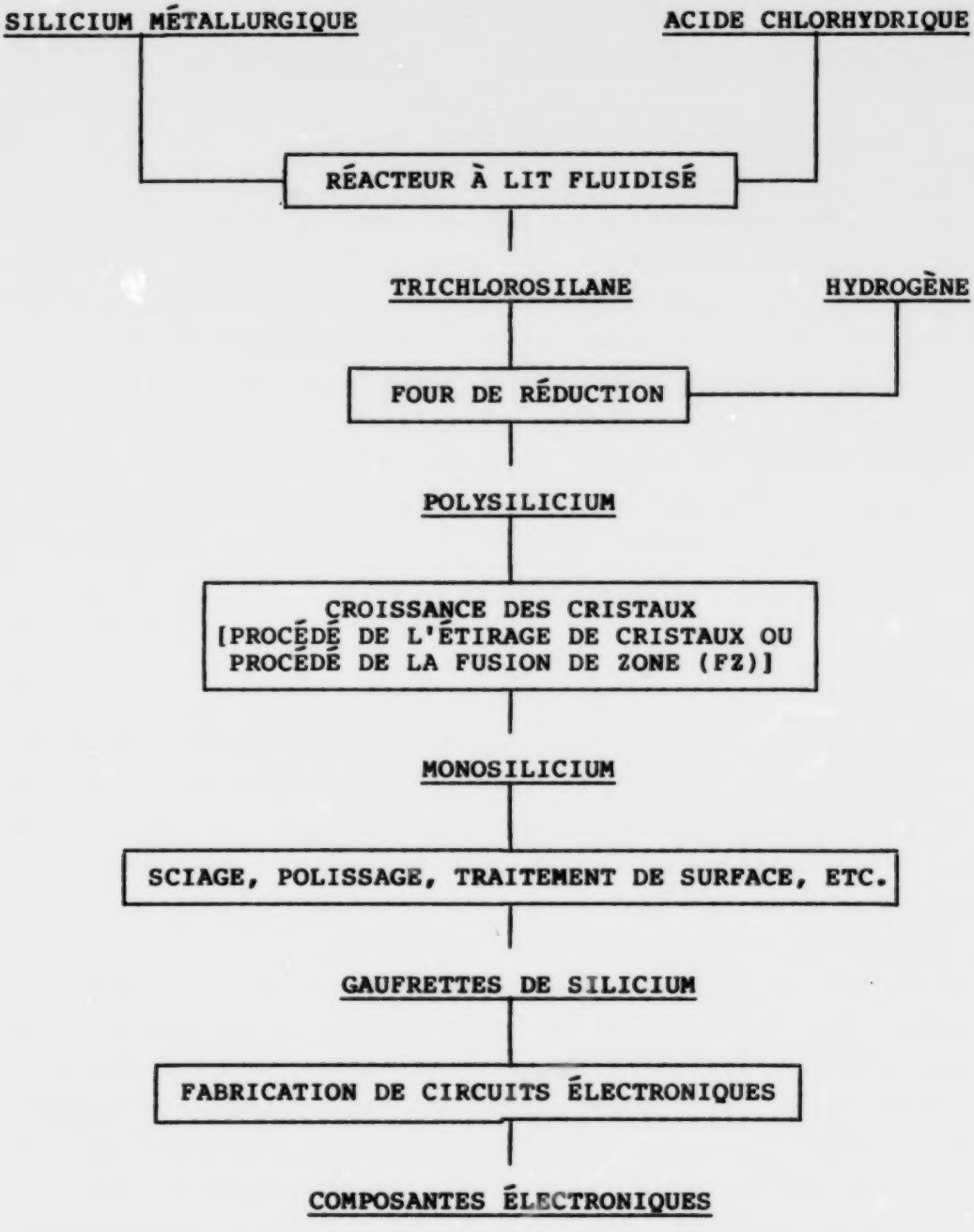


Figure 3 Répartition de la consommation du silicium métallurgique, aux Etats-Unis.

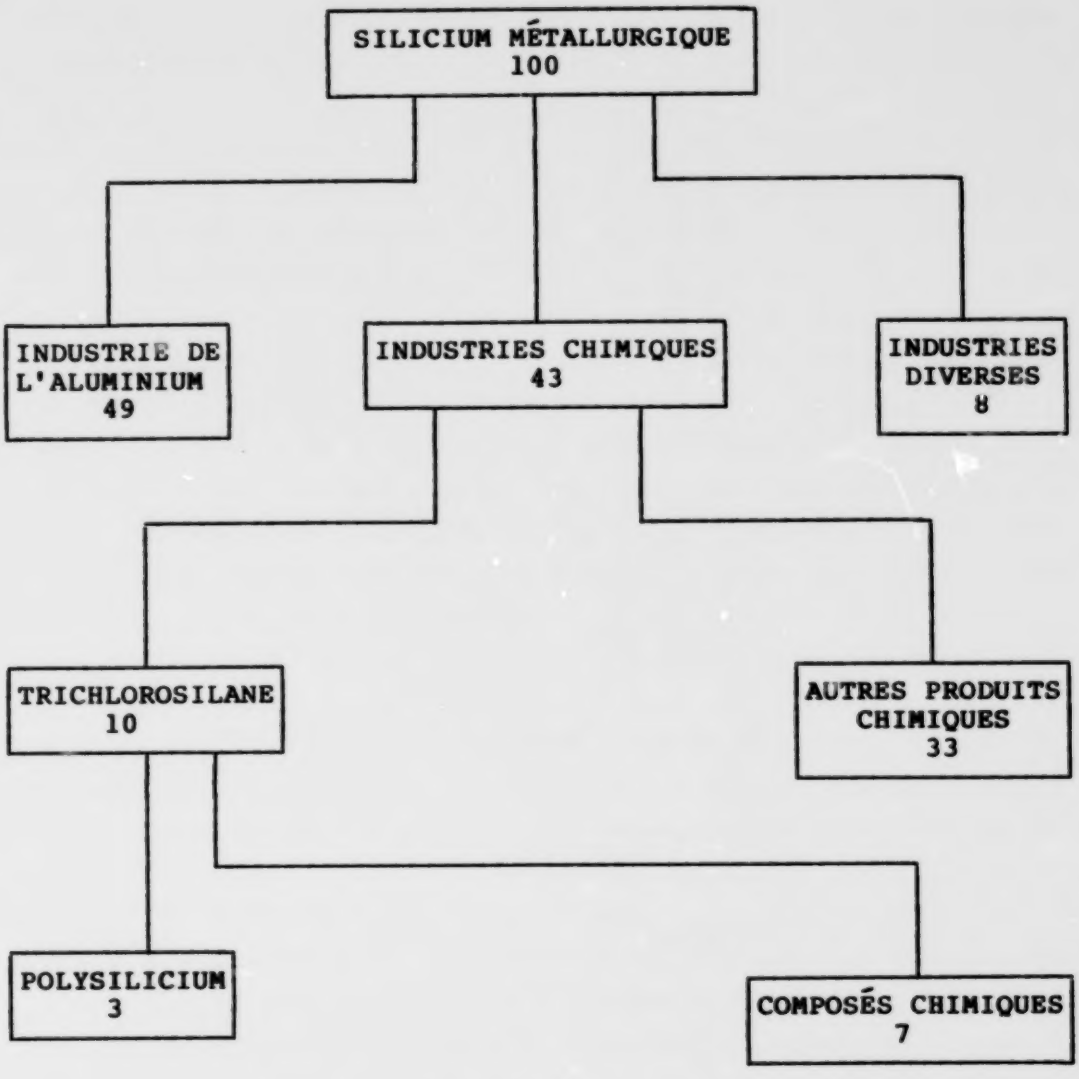
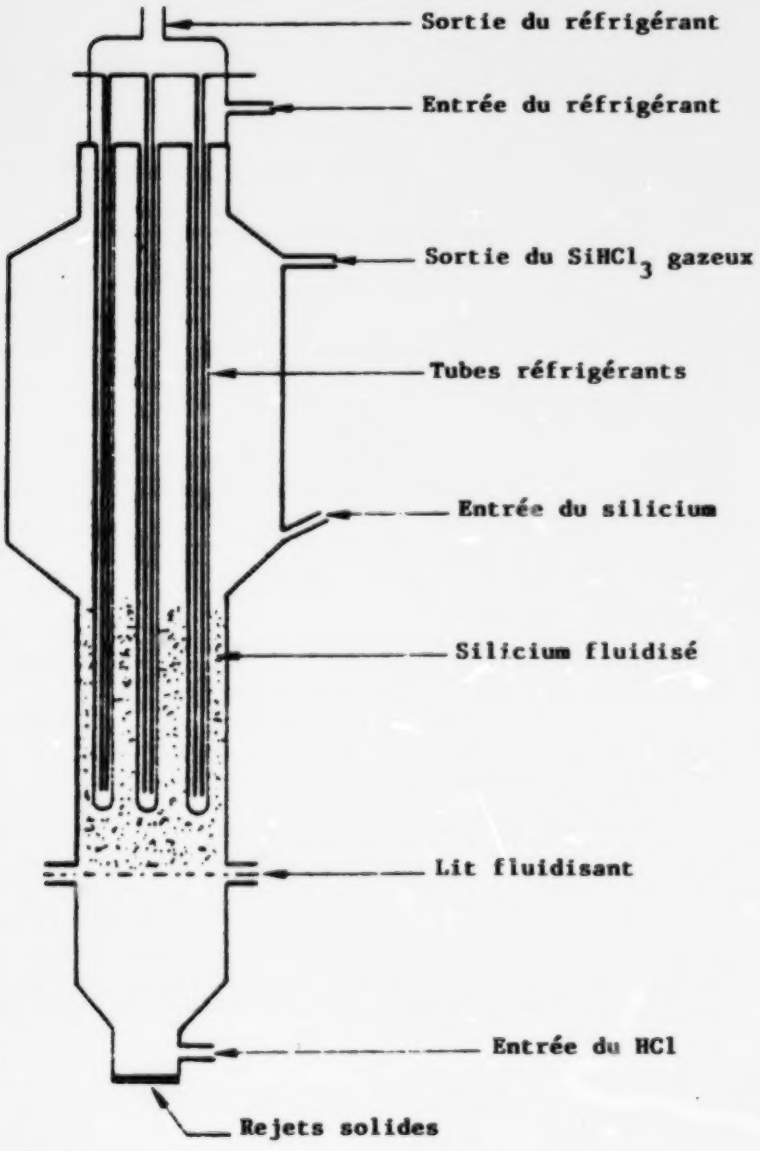


Figure 4: Fabrication de Trichlorosilane à partir de silicium métallurgique et d'acide chlorhydrique anhydre dans un réacteur à lit fluidisé.



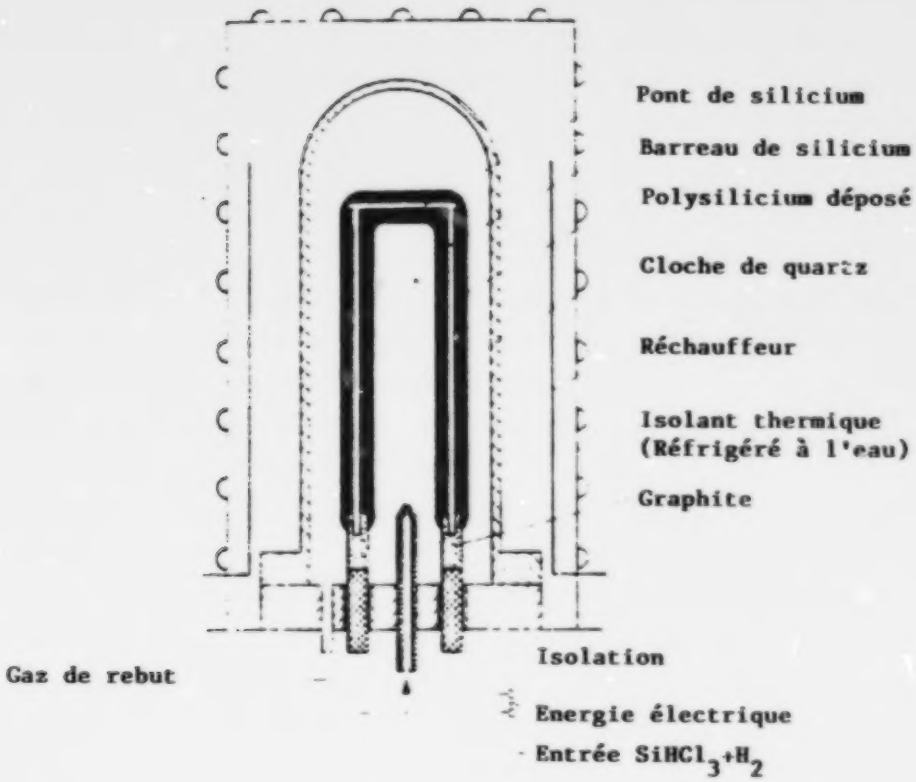
2.3- Polysilicium

Jusqu'à aujourd'hui, plus de 90% du polysilicium produit dans le monde dérivait du trichlorosilane. Les autres produits utilisés sont le tétrachlorure de silicium ($SiCl_4$) et le silane (SiH_4). Il y a aussi des projets pilotes qui expérimentent le bromure de silicium ($SiHBr_3$) comme matière première.

Le polysilicium est obtenu par la réduction du trichlorosilane à l'aide d'hydrogène (H_2). Cette opération se fait sous atmosphère d'azote (N_2) dans un four électrique. Il existe à peu près autant de types de réacteurs qu'il y a de producteurs mais la majorité des techniques utilisées sont issues du procédé Siemens (Figure 5). Dans ce procédé, du trichlorosilane et de l'hydrogène sont introduits dans un four où de minces barreaux de polysilicium sont chauffés à de très hautes températures (entre 1 000°C et 1 200°C). A ces températures, le trichlorosilane se dissocie et le silicium vient se déposer sur les barreaux de polysilicium. Ces barreaux sont ensuite, selon la technique utilisée pour la prochaine étape de transformation, soit broyés, soit usinés. La capacité des fours varie de 5 t/an à 35 t/an selon leur taille et leur degré d'avancement technologique. En termes de capacité de production, le standard actuel est de l'ordre de 1 000 t/an et nécessite des investissements entre 70 M$ et 80 M$.

Selon l'efficacité de la technologie utilisée, la production d'un kilo de polysilicium peut nécessiter entre 4 et 8 kilos de trichlorosilane. Quant à l'énergie électrique, c'est à l'étape de transformation du trichlorosilane en polysilicium qu'il s'en consomme le plus. En effet, la production d'un kilo de polysilicium à partir du trichlorosilane nécessite

Figure 5: Fabrication de polysilicium par la réduction du trichlorosilane à l'aide d'hydrogène dans un four électrique (Procédé Siemens).



160 kWh. A titre de comparaison, voici la consommation d'énergie électrique nécessaire à la fabrication de certains autres produits:

- polysilicium	160,0 kWh/kg
- magnésium	17,5 kWh/kg
- silicium métallurgique	13,5 kWh/kg
- aluminium	13,5 kWh/kg
- acier (four électrique)	0,5 kWh/kg

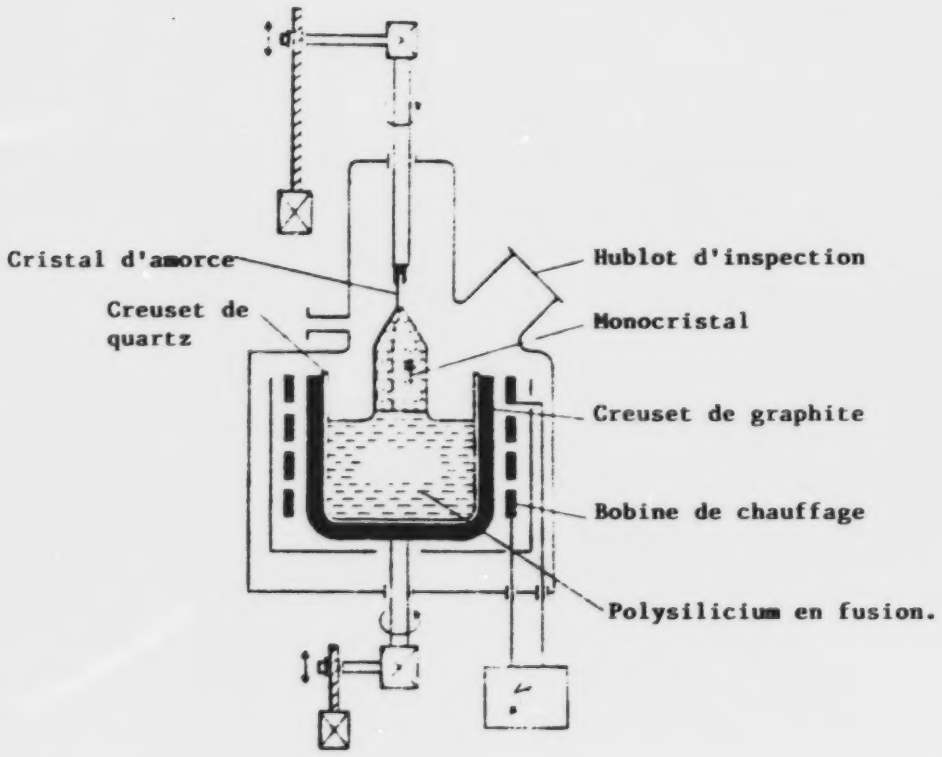
2.4- Monosilicium

Le polysilicium est transformé en monocristaux de silicium dans des fours utilisant l'énergie électrique. Deux technologies sont présentement utilisées à cette fin, soit celle de l'étirage de cristaux et celle de la fusion de zone.

A l'échelle mondiale, plus de 90% du monosilicium est produit par la méthode de l'étirage de cristaux, appelée aussi méthode Czochralski (CZ) (figure 6). Suivant cette technique, le polysilicium broyé est fondu dans un creuset. Un cristal d'amorce en silicium est alors introduit dans le matériau en fusion pour être ensuite tiré progressivement vers le haut, provoquant ainsi la croissance d'un cristal de silicium. En plus de modifier la structure du silicium, cette technique a aussi comme effet de purifier le produit car les impuretés ont tendance à se maintenir dans le matériau en fusion.

En moyenne les fours d'étirage de cristaux peuvent convertir, par jour, de 15 kilos à 20 kilos de polysilicium en monosilicium. Théoriquement, le diamètre des lingots ainsi produits peut varier de 50 mm à 150 mm. Le diamètre le plus courant est d'environ 100 mm. Certains lingots de 125 mm sont actuellement sur le marché et il est fort probable qu'à

Figure 6: Fabrication de monosilicium par étirage de cristaux (Procédé CZOCHRALSKI)

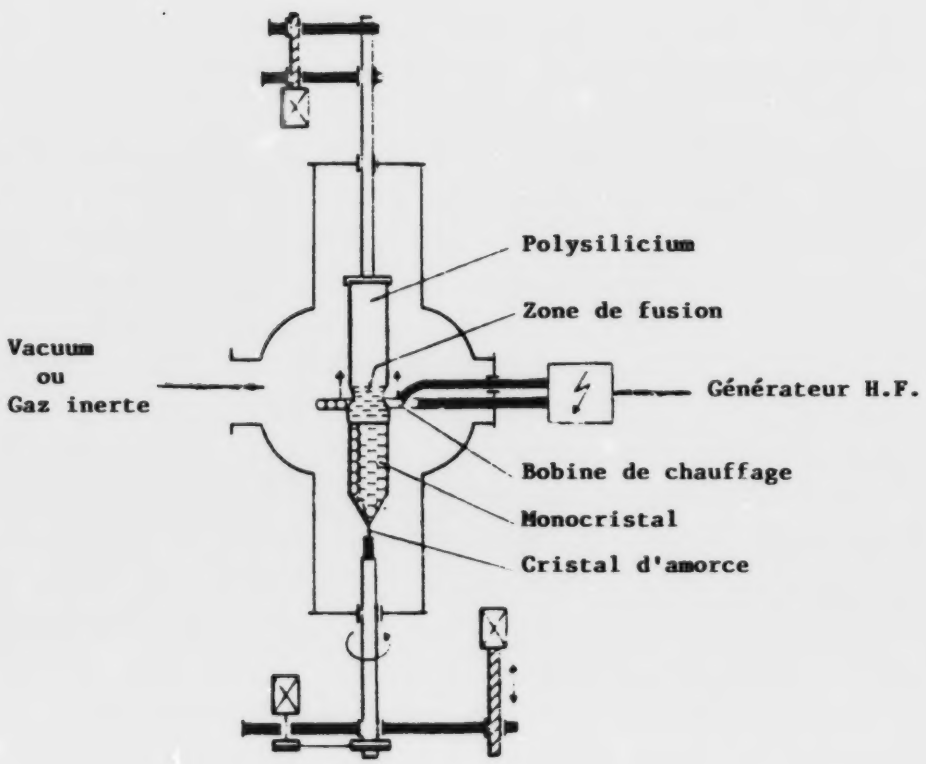


court ou moyen terme, des lingots de 150 mm, et peut-être plus, seront disponibles. Selon le degré d'avancement technologique des fours ainsi que de la dimension des cristaux, la production d'un kilo de monosilicium nécessite entre 1,2 kilos et 2,0 kilos de polysilicium. Cette étape de transformation est, elle aussi, grande consommatrice d'électricité puisque 100 kWh/kg sont nécessaires pour transformer le polysilicium en monosilicium. La transformation de 1 000 tonnes de polysilicium donne entre 500 et 800 tonnes de monosilicium et implique des investissements d'environ 60 000 $ par tonne de capacité.

La seconde technologie utilisée pour la croissance de cristaux, soit la fusion de zone (figure 7), consiste à chauffer localement un barreau de polysilicium pré-usiné. La possibilité d'effectuer successivement plusieurs fusions de zone permet d'obtenir, en plus d'une structure monocristalline, un produit de très haute pureté. Il semble même que la fusion de zone permette d'obtenir un produit plus pur que celui obtenu par l'étirage de cristaux. La chaleur nécessaire au procédé est fournie par une bobine concentrique entourant le barreau de polysilicium et portant un courant à haute fréquence. Comme dans l'étirage de cristaux, un cristal d'amorce en silicium est utilisé pour provoquer le démarrage du processus de cristallisation. Le diamètre d'un lingot produit au moyen de cette méthode peut atteindre 125 mm et la longueur, 1 500 mm. Bien que nous n'ayons pas de données précises sur la quantité d'énergie électrique qu'exige cette technique, nous estimons qu'elle en consomme probablement autant que la première, sinon plus.

Un dernier point à mentionner à propos de cette étape de la fabrication est que la production de monosilicium est, de façon générale, intégrée à la fabrication des gaufrettes.

Figure 7: Fabrication de monosilicium par la fusion de zone (FZ).



2.5- Gaufrettes de silicium

Les lingots de monosilicium sont sciés en gaufrettes dont l'épaisseur varie de 0,370 mm à 0,625 mm. L'épaisseur d'une gaufrette varie suivant son diamètre. En effet, plus le diamètre est grand, plus la gaufrette doit être épaisse afin de maintenir son intégrité structurale qui est d'une importance capitale, car, étant donnée la valeur ajoutée d'une gaufrette en comparaison de la matière de départ, toute perte devient très coûteuse.

Au cours de cette étape de la fabrication, les lingots de monosilicium sont sciés en gaufrettes à l'aide de scies circulaires à diamant ou de scies à câbles enduits de poussière de diamant. A cause de l'épaisseur des scies, jusqu'à 40% du matériau est perdu à cette étape.

En ce qui concerne la qualité de la surface des gaufrettes, les exigences des différents utilisateurs font que des traitements, tels que le polissage, le décapage chimique et l'épitaxie sont nécessaires. Au cours de toutes ces opérations, on utilise des produits chimiques de très haute qualité, aussi bien pour le contrôle de l'atmosphère (gaz industriel) que pour les traitements chimiques proprement dits.

2.6- Composantes électroniques

La transformation de gaufrettes en composantes électroniques peut compter jusqu'à 35 étapes différentes.

Les composantes électroniques comprennent une grande variété de produits, qui peuvent être regroupés en deux grandes catégories:

- les composantes discrètes (diodes, transistors, thyristors, redresseurs, etc.);

- les circuits intégrés (systèmes analogiques et numériques, mémoires, etc.).

Ces produits sont finalement intégrés dans de l'équipement électronique qui, pour sa part, est vendu directement aux consommateurs.

3- Production de polysilicium

Il y a, ou il y aura sous peu, un total de 15 producteurs de polysilicium dans le monde noncommuniste. Il y a aussi un certain nombre d'entreprises qui ont montré un intérêt pour ce produit mais rien n'est encore confirmé à ce sujet. La présente section, en plus d'un certain nombre de renseignements de base, contient des commentaires particuliers sur ces entreprises productrices. De façon générale, les producteurs de polysilicium se limitent rarement à cette seule production. De fait, ils sont, pour la plupart, intégrés soit en amont soit en aval de ce produit.

3.1 Etats-Unis

3.1.1 Hemlock Semiconductor

Cette entreprise est une filiale de Dow Corning. Elle exploite une usine d'une capacité de 1 000 t/an à Hemlock (Michigan). Par sa société mère, elle est intégrée en amont jusqu'au silicium métallurgique. En effet, Dow Corning produit du silicium métallurgique à Springfield (Oregon) et du trichlorosilane à Midland (Michigan). Un important projet d'investissements d'environ 53 M$ US, actuellement en cours de réalisation, permettra de doubler la capacité de l'usine de Hemlock. Dow Corning n'est cependant pas seule pour réaliser ce projet. En effet, ce sont trois entreprises, soit Dow Corning (63,25%), Shin Etsu Endotai (24,5%) et Mitsubishi Electric (12,25%) qui mèneront le projet à terme.

3.1.2 General Electric

Cette entreprise exploitait, jusqu'au début de 1986, une usine d'une capacité de 190 t/an à Chandler (Arizona). Cependant, General Electric, qui avait acheté cette usine en 1981 à la Great Western Silicon, l'a revendue tout récemment à la société japonaise Nippon Kokan K.K.. General Electric est partiellement intégrée en amont ainsi qu'en aval. En effet, elle produit du trichlorosilane à Waterford (Connecticut), des composantes électroniques et des équipements électroniques à Auburn (New York), Cupertino (Californie) et Research Triangle Park (Caroline du Nord).

Récemment, General Electric a avancé l'hypothèse qu'elle pourrait installer une usine d'une capacité de 2 000 t/an près de son usine de trichlorosilane et de silicone à Waterford (Connecticut).

3.1.3 Monsanto Electronic Materials Company

Cette entreprise exploite une usine d'une capacité de 250 t/an à St. Peters (Missouri). Le polysilicium produit à cet endroit est transformé en monosilicium et en gaufrettes dans les usines de Monsanto à Spartanburg (Caroline du Nord) et Kuala Lumpur (Malaisie). En association avec Kirosil Company Ltd, Monsanto produira des gaufrettes en Corée. L'entreprise achète déjà sur le marché une partie du polysilicium dont elle a besoin. Il est de plus probable que, si Monsanto pouvait obtenir du polysilicium marchand à prix compétitifs et à une source fiable, elle choisirait de fermer son usine actuelle plutôt que de la moderniser et de l'agrandir.

3.1.4 Motorola

Cette entreprise exploite une usine d'une capacité de 100 t/an à Phoenix (Arizona). Motorola est complètement intégrée en aval. En outre, elle est le second fabricant mondial de composantes électroniques en silicium avec des usines aux Etats-Unis, au Japon, au Sri Lanka, en Ecosse et en France. Motorola achète sur le marché une grande partie du polysilicium qu'elle utilise et n'a encore jamais envisagé une participation plus grande à la fabrication de ce produit.

3.1.5 Texas Instruments

Cette entreprise exploite une usine d'une capacité de 350 t/an à Sherman (Texas). Elle est intégrée à partir du trichlorosilane jusqu'à l'équipement électronique avec ses usines situées à Dallas et Sherman (Texas). Texas Instruments n'a encore fait aucune déclaration concernant une possible augmentation de sa capacité de production de polysilicium. Cependant, advenant une croissance de ses besoins internes, il est plus que probable qu'elle préférerait de beaucoup augmenter sa capacité de production plutôt que de dépendre de fournisseurs externes.

3.1.6 Union Carbide

En 1981, cette entreprise a construit une usine pilote d'une capacité de 100 t/an à Washougal (Washington) qui utilise le silane comme matière première. Les résultats ayant été positifs, Union Carbide a entrepris la construction, à Mooses Lake (Washington), d'une usine d'une capacité de 1 200 t/an qui devrait être en pleine activité dès 1987. De plus, la compagnie a déjà entrepris des travaux pour doubler

la capacité de cette usine. 11 est probable que l'usine pilote sera fermée lorsque l'usine de Mooses Lake entrera en activité. Le degré d'intégration d'Union Carbide est très faible. En effet, elle ne produit que du silane et du polysilicium. Union Carbide a aussi déclaré qu'elle engisageait la possibilité de construire une autre usine d'une capacité de 3 000 t/an à un endroit non encore déterminé aux Etats-Unis.

3.1.7 Wacker Siltronic Corporation

Cette entreprise est une filiale de la société allemande Wacker-Chemie GmbH. Au cours des dernières années, Wacker Siltronic a construit, à Portland (Oregon), une usine de gaufrettes. A la fin de 1984, elle annonçait la construction, au même endroit, d'une usine de production de polysilicium de 5 000 t/an. Ce projet, évalué à plus de 80 M$ US, devait entrer en production en 1987. Toutefois, il y a quelque temps, Wacker Siltronic annonçait que son projet serait retardé de 6 à 12 mois parce qu'on a découvert des substances toxiques sur le lieu d'implantation de la future usine.

3.1.8 Ethyl Corporation

Cette entreprise, bien connue dans le secteur des produits chimiques organo-métalliques, construit présentement une usine pour la production de polysilicium près de Houston (Texas). Ce projet, évalué à 45 M$ US, aura une capacité de production de 1 000 t/an et des investissements, devant permettre de porter la capacité à 3 000 t/an, seront consentis dès le départ. Le démarrage de la première phase est prévu pour la seconde moitié de 1987. Ethyl utilisera le silane comme matière première.

3.1.9 J.C. Schumacher

Ce producteur de dopants pour l'industrie de l'électronique, exploite, depuis la mi-1985, une usine pilote de polysilicium d'une capacité de 70 t/an à Oceanside (Californie). La technologie expérimentée à cet endroit utilise du bromure de silicium comme matière première. Au début de 1986, la société Air Products des Etats-Unis, un important producteur de gaz industriels, a acheté cette usine. L'objectif d'Air Products est de poursuivre le développement de cette technologie. Advenant des résultats positifs, Air Products envisagerait plutôt de mettre cette technique à la disposition d'éventuels clients plutôt que de l'exploiter elle-même. En effet, Air Products préfère ne pas se lancer dans la production de polysilicium car, se faisant, elle deviendrait un concurrent de certains de ses clients.

3.1.10 Great Lakes Chemical

Cette entreprise, qui a une très vaste expérience dans l'industrie du brome, construit présentement une usine pilote à Newport (Tennessee). La technologie qui sera expérimentée à cette usine utilisera le bromure de silicium comme matière première. Ce projet pourrait conduire, à plus long terme, à l'implantation d'une usine de polysilicium si les résultats s'avéraient favorables.

3.1.11 Nippon Kokan K.K.

Cette entreprise, le second producteur japonais d'acier, a créé récemment une nouvelle division, la "New Materials Division", dont l'objectif principal est de diversifier les activités de NKK. Dans le cadre de cette diversification, NKK a acquis l'usine de General Electric située à Chandler (Arizona) et a l'intention d'implanter en Amérique du Nord

une usine pour la production de 1 000 t/an de polysilicium. Le choix définitif d'un site d'implantation n'a pas encore été fait mais la Côte-Ouest des Etats-Unis semble l'endroit le plus probable. La construction de l'usine devrait débuter en 1986, avec démarrage en 1988.

3.2 Europe

3.2.1 Dynamit Nobel Silicon

Cette entreprise exploite, à Merano (Italie), une usine de polysilicium d'une capacité de production de 350 t/an. Il s'agit d'une filiale de Dynamit Nobel AG d'Allemagne de l'Ouest qui s'occupe principalement d'explosifs, de plastiques et de produits chimiques. Dynamit Nobel AG, avec sa filiale italienne, est intégrée du trichlorosilane jusqu'à la gaufrette. Elle est de plus associée à la société américaine W.R. Grace pour étudier la possibilité d'implanter à Mobile (Alabama) une usine pour la production de polysilicium. Un autre projet est aussi à l'étude chez Dynamit Nobel. Ce projet consiste à faire passer la capacité de l'usine italienne à 500 t/an.

3.2.2 Phoenix Materials Company

Cette entreprise est la société mère de Silicon Electro Physics Inc.. En 1981, elle a acheté à Motorola l'usine Topsil située à Frederikssund (Danemark). Cette usine, qui utilise le tétrachlorure de silicium comme matière première pour produire le polysilicium, à une capacité de 15 t/an. A cause de certains problèmes de rentabilité, il est probable que si Phoenix Materials Company ne trouve pas d'acheteur pour son usine danoise, cette dernière devra fermer ses portes.

Avec ses usines de Bradford (Pennsylvanie) et de Mountain View (Californie), Phoenix Materials Company est intégrée jusqu'aux composantes électroniques.

3.2.3 Wacker-Chemie GmbH

Cette entreprise est le chef de file de l'industrie du polysilicium avec une usine d'une capacité de production de 2 200 t/an à Burghausen (Allemagne de l'Ouest). Il est de plus probable qu'elle maintiendra cette position dans l'avenir car elle envisage la possibilité de porter sa capacité à 5 000 t/an, en Allemagne de l'Ouest, et elle participe à un important projet aux Etats-Unis (voir section 3.1.7). Wacker est intégrée du trichlorosilane jusqu'à la gaufrette.

3.2.4 Rhône Poulenc et Siltec

La société française Rhône Poulenc s'est associée avec la société américaine Siltec pour construire, en France, une usine pour la production de gaufrettes de silicium. Sans que cela n'ait cependant été confirmé, les partenaires envisageraient de s'intégrer jusqu'au polysilicium, en France, d'ici 1990.

3.3 Japon

3.3.1 Tokuyama Soda

Cette importante entreprise japonaise est très active dans plusieurs secteurs de l'industrie chimique tels que ceux des chloralcalis, du carbonate de sodium, des dérivés chlorés, des résines, du ciment et du polysilicium. Ce dernier

produit n'est fabriqué que depuis très peu de temps par l'entreprise. En fait, Tokuyama Soda a construit, en 1984, une usine d'une capacité de 200 t/an de polysilicium. Cette capacité a été portée à 1 000 t/an en 1985 et il est possible que, d'ici 1990, elle passe à 2 000 t/an. Bien que sa présence dans ce secteur industriel soit récente, Tokuyama Soda a l'intention de lui accorder une importance accrue dans les années à venir.

3.3.2 Komatsu Electronic Metals

Cette entreprise exploite, à Shinomiya (Japon), une usine de polysilicium d'une capacité de 50 t/an. La matière première utilisée est le silane et la technologie employée par Komatsu donne un matériau de très grande pureté. Cette technologie, mise au point par l'entreprise, aurait été vendue à Union Carbide pour son usine de Mooses Lake (Washington). Il est probable qu'après le démarrage de cette usine, Komatsu achètera son polysilicium à Union Carbide, fermera son usine japonaise de polysilicium et concentrera ses efforts à la production de gaufrettes et de composantes électroniques.

3.3.3 Hi-Silicon Co. Ltd

Cette entreprise, plus connue sous le nom de Osaka Titanium, est une entreprise en coparticipation réunissant Osaka Titanium Co. Ltd et Mitsubishi Metal. Elle exploite, à Yokkaichi (Japon), une usine dont la capacité vient d'être portée à 1 000 t/an. Hi-Silicon est intégrée du trichlorosilane jusqu'à la gaufrette. Osaka Titanium a récemment montré un intérêt pour l'implantation d'une usine de polysilicium d'une capacité de 1 000 t/an au Québec. Il semble cependant que ce projet ne soit envisagé que dans une perspective à plus ou moins long terme.

3.3.4 Shin Etsu Handotai

Cette entreprise exploite, à Naoetsu (Japon), une usine de polysilicium d'une capacité de 160 t/an. Elle est intégrée à partir du trichlorosilane jusqu'à la gaufrette. Shin Etsu Handotai est le premier producteur japonais de gaufrettes et l'un des premiers producteurs mondiaux avec ses usines au Japon et aux Etats-Unis. A cause de ses investissements récents dans la production de gaufrettes de silicium, Shin Etsu a des besoins croissants en polysilicium. Comme elle ne veut pas dépendre de son concurrent, Osaka Titanium, comme fournisseur de polysilicium, elle a décidé d'investir dans l'agrandissement de l'usine américaine de Hemlock Semiconductor.

3.4 Ailleurs dans le monde

3.4.1 Indes

La compagnie National Silicon négocie présentement un transfert de technologie avec Dow Corning pour implanter une usine de polysilicium d'une capacité de production de 200 t/an dans la région de Mettur (Inde). La construction de cette usine a ommencé au début de 1986.

3.4.2 République Populaire de Chine

Un projet, évalué à 25 M$ US, pour la construction d'un complexe polysilicium/gaufrettes serait à l'étude. Ce complexe serait implanté dans la région de Luoyang (Chine).

Tableau 1 Producteurs mondiaux de polysilicium en 1985, projets planifiés et projets à l'étude pour 1990, en tonnes.

Société	Emplacement	1985[1]	1990[2]	1990[3]
Etats-Unis				
Hemlock Semiconductor	Hemlock, Michigan	1000	2000	2000
General Electric	Waterford, Connecticut.	0	0	2000
Monsanto Electronic	St-Peters, Missouri	250	250	0
Motorola	Phoenix, Arizona	100	100	100
Texas Instruments	Sherman, Texas	350	350	350
Union Carbide	Washougal, Washington	100	0	0
	MoosesLake, Washington	1200	2400	2400
	N.D.	0	0	3000
Wacker Siltronic	Portland, Oregon	0	5000	5000
Ethyl Corporation	Houston, Texas	0	1000	3000
J.C. Schumacher	Oceanside, Californie	70	70	70
Great Lake Chemicals	Newport, Tennessee	N.D.	N.D.	N.D.
Nippon Kokan K.K.	N.D.	0	1000	1000
	Chandler, Arizona	190	190	190
	Total partiel	3260	12360	19110
Europe				
Dynamit Nobel	Merano, Italie	350	350	500
Phoenix Materials	Frederikssund, Danemark	15	15	0
Wacker-Chemie	Burghausen, RFA	2200	2200	5000
Rhône Poulenc	N.D., France	N.D.	N.D.	N.D.
	Total partiel	2565	2565	5500

Tableau 1 **Producteurs mondiaux de polysilicium en 1985, projets planifiés et projets à l'étude pour 1990, en tonnes.** (suite)

Société	Emplacement	1985[1]	1990[2]	1990[3]
Japon				
Tokuyama Soda	Tokuyama, Japon	1000	1000	2000
Komatsu Electronic	Shinomiya, Japon	50	50	0
Hi-Silicon	Yokkaichi, Japon	1000	1000	1000
Shin Etsu	Naoetsu, Japon	160	160	160
	Total partiel	2210	2210	3160
Ailleurs dans le monde				
Natinal Silicon	Mettur, Inde	0	200	200
N.D.	Luoyang, Chine	N.D.	N.D.	N.D.
	Total partiel	0	200	200
	GRAND-TOTAL	8035	17335	28020

N.D.: Non déterminé

[1] Capacité existante en 1985.

[2] Capacité existante en 1985 plus celle planifiée pour 1990.

[3] Capacité existante en 1985, celle planifiée pour 1990 plus celle à l'étude pour 1990.

4- Transformation, au Québec, du silicium destiné à l'électronique

Cette section traitera, dans une optique québécoise, des six étapes majeures du processus de transformation du silicium destiné à l'électronique dont il a été question à la section 2. Nous verrons donc, pour chacune de ces étapes, ce qui est déjà présent au Québec en termes de matières premières, d'énergie, de technologies, etc.

4.1 Silicium métallurgique

Il y a, au Québec, trois entreprises oeuvrant dans le domaine des ferro-alliages. La première, SKW Canada inc. à Bécancour, exploite 2 fours électriques avec lesquels elle peut produire au total 25 000 t/an de silicium métallurgique. De plus, l'usine actuelle avait été construite, dès le départ, pour qu'on puisse installer un troisième four. SKW Canada inc. pourrait donc aisément et rapidement s'agrandir pour approvisionner en silicium métallurgique toute entreprise de production de polysilicium.

La seconde, Elkem Metal Canada inc. à Beauharnois, possède 2 fours électriques d'une capacité totale de 7 000 t/an de silicium métallurgique. Ces unités de production sont arrêtées depuis quatre ans mais elles pourraient facilement être remises en marche pour fournir un producteur de polysilicium.

Quant à la troisième, Chromasco Division Timminco ltée à Beauharnois, elle ne produit pas à l'heure actuelle de silicium métallurgique mais du ferrosilicium à 85% Si. Cependant, étant donné son savoir-faire dans le domaine, elle pourrait aussi devenir un fournisseur de silicium métallurgique pour un producteur de polysilicium.

Il y a donc déjà, en ce qui concerne le silicium métallurgique, tout ce qu'il faut au Québec pour approvisionner un producteur de polysilicium. Il ne faut pas oublier non plus qu'un nouvel investisseur pourrait être intéressé à produire du silicium métallurgique.

4.2 Trichlorosilane

Il n'y a pas, à l'heure actuelle, au Québec, de producteur de trichlorosilane, ce produit obtenu par la réaction du silicium métallurgique et de l'acide chlorhydrique anhydre. Le silicium métallurgique a été traité dans la section précédente. Quant à l'acide chlorhydrique anhydre, il n'est pas produit au Québec ni au Canada à l'heure actuelle mais une entreprise locale, qui produit des gaz industriels, Prodair de LaSalle, possède la technologie nécessaire et exploite déjà une usine en Pennsylvanie. Suivant la technologie utilisée, pour produire de l'acide chlohydrique anhydre, on fait l'électrolyse d'acide chlorhydrique commercial, tel que celui produit par CIL à Bécancour. Selon Prodair, l'implantation au Québec d'une usine de polysilicium justifierait, à elle seule, l'implantation d'une usine pour la production d'acide chlorhydrique anhydre.

4.3 Polysilicium

La fabrication du polysilicium est présentement absente du Québec. Cependant, en ce qui a trait aux intrants majeurs nécessaires à cette fabrication, le Québec dispose d'un certain nombre d'entreprises qui les produisent déjà. Ces intrants majeurs sont l'énergie électrique et les gaz industriels de grande pureté. La production de polysilicium nécessitant une consommation d'énergie électrique de 160

kWh/kg, la disponibilité et le coût de cette énergie deviennent donc des facteurs importants d'implantation pour une industrie de ce type.

Les gaz industriels de grande pureté qui sont utilisés dans la production du polysilicium sont l'azote et l'hydrogène. Il y a actuellement trois entreprises qui produisent de ces gaz au Québec et une des principales raisons de leur présence est le coût et la disponibilité de l'électricité du Québec. C'est un facteur important car ce genre de production nécessite de grandes quantités d'électricité. La première, Air Liquide Canada ltée, produit de l'azote à Varennes et produira sous peu de l'hydrogène liquide à Bécancour. La seconde, Linde-Union Carbide du Canada ltée, produit de l'azote à Montréal-Est et à Tracy. La troisième, Prodair, produit de l'hydrogène gazeux à Montréal-Est. En plus des gaz qu'elles produisent au Québec, les deux dernières entreprises peuvent fournir les autres gaz à partir d'usines situées ailleurs. De plus, l'importance de la consommation en gaz d'une usine de polysilicium pourrait amener les entreprises citées précédemment à envisager des agrandissements ou de nouvelles usines.

4.4 Monosilicium

La transformation du polysilicium en monocristaux de silicium est présentement absente du Québec. Cependant, une entreprise d'Ottawa, TPK Solar Systems, qui fabrique des piles solaires constituées de gaufrettes de monosilicium, songe à s'intégrer en amont. Elle s'intéresse donc à la croissance de cristaux pour produire ses gaufrettes.

Bien que n'étant pas un facteur d'implantation déterminant pour ce type d'industrie, il reste que l'électricité est

relativement importante dans la croissance des cristaux car il faut environ 100 kWh pour produire 1 kg de monosilicium.

4.5 Gaufrettes de silicium

La fabrication de ces produits est généralement intégrée à la transformation précédente, soit la croissance de cristaux de monosilicium. Comme la précédente, elle est aussi absente du Québec. Il y a cependant, tant au Québec que dans l'Est de l'Ontario, un nombre croissant d'utilisateurs de gaufrettes de silicium.

4.6 Composantes électroniques

Il y a présentement, au Québec et dans l'Est de l'Ontario, six entreprises qui fabriquent des composantes électroniques à partir de gaufrettes de silicium et une qui étudie un important projet d'investissement. Il s'agit, par ordre d'importance, de Northern Telecom Ltd., Mitel Corporation Ltd., Siltronics Limited, Linear Technologies Inc., TPK Solar Systems, RCA et peut-être Silonex dans un proche avenir.

Bien qu'actuellement la quantité de gaufrettes de silicium consommée par l'ensemble de ces entreprises soit plutôt modeste, il reste que le dynamisme de ce secteur industriel présente un potentiel intéressant pour l'avenir. Il ne faut pas non plus oublier le marché que représente la région de Boston, dont le secteur de l'électronique est en pleine croissance et qui est un marché naturel pour un producteur de gaufrettes de silicium qui serait établi au Québec.

5- Conclusion

La présente monographie permet de faire ressortir un certain nombre d'éléments particuliers à l'industrie du polysilicium. Parmi ces éléments, les principaux sont:

- Le taux de la croissance mondiale pouvant atteindre, au cours des prochaines années, 30% par an selon certains, la capacité de production mondiale pourrait être déficitaire en 1990;

- L'énergie électrique joue, aux différentes étapes de la transformation du silicium destiné à l'électronique, un rôle très important:

• silicium métallurgique	13,5 kWh/kg
• trichlorosilane	3,2 kWh/kg
• polysilicium	160,0 kWh/kg
• monosilicium	100,0 kWh/kg

- Les matières premières, telles que l'électricité et les gaz industriels de grande pureté, sont des facteurs d'implantation déterminants pour l'industrie du polysilicium;

- Selon le degré d'avancement technologique des procédés utilisés, la quantité totale d'électricité que nécessite la production d'un kilo de polysilicium peut varier entre 250 et 400 kWh. Au tarif actuel d'Hydro-Québec, l'électricité représenterait entre 6% et 10% du prix de vente actuel du polysilicium;

- Les différentes étapes du processus de transformation du silicium destiné à l'électronique peuvent être regroupées de la manière suivante:

. silicium métallurgique;
. trichlorosilane et polysilicium;
. monosilicium et gaufrettes;
. composantes électroniques.

- A des degrés divers, certains de ces produits, ou les intrants nécessaires à leur fabrication, se fabriquent déjà au Québec;

- La valeur ajoutée du polysilicium est très élevée puisque la matière première de base, le silicium métallurgique, a une valeur d'environ 1,75 $/kg alors que celle du produit fini, le polysilicium, varie entre 100,00 $/kg et 125,00 $/kg à l'heure actuelle.